

高猛,蔡永平.一种利用LLI参数改进TurboEdit北斗周跳探测的方法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(4):459-467.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250506

Gao Meng, Cai Yongping. A method for improving the BeiDou cycle slip detection in TurboEdit using LLI parameters[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026, 45(4): 459-467. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250506

一种利用LLI参数改进TurboEdit北斗周跳探测的方法

高 猛, 蔡永平

(辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 针对传统TurboEdit周跳探测方法存在漏判与误判问题, 提出一种融合失锁指示器(LLI)的改进方法(TurboEdit+LLI)。该方法通过LLI实时锁定信号失锁历元, 划定周跳存在区间, 结合TurboEdit实现北斗信号周跳的准确探测。采用多类型接收机进行方法可靠性验证并开展精密单点定位实验, 结果表明: TurboEdit+LLI周跳探测准确率显著提升, 其中, 旗舰型接收机SEPT POLARX5周跳误判数从1 807降至25; 静态定位模式下, TurboEdit+LLI在E、N、U方向的定位精度与TurboEdit、LLI方法相当; 仿动态定位模式下, 部分测站(如CIBG)在E、N、U方向的定位精度较TurboEdit分别提升36.4%、59.3%、55.9%, 较LLI分别提升43.5%、7.7%、31.5%, 可有效改善复杂场景下的定位性能。

关键词: 北斗卫星导航系统; 周跳探测; TurboEdit; 失锁指示器; 精密单点定位

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)04-0459-09

A method for improving the BeiDou cycle slip detection in TurboEdit using LLI parameters

Gao Meng, Cai Yongping

(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To solve the missing detection and false detection defects of the traditional TurboEdit cycle slip detection method, this study proposes an improved method (TurboEdit+LLI) integrating the loss of lock indicator (LLI) from the original BeiDou observation data. This method captures the loss-of-lock epoch of the signal in real time through LLI and defines the cycle slip existence interval. Accurate detection of the cycle slip of BeiDou signals is achieved in combination with TurboEdit. The reliability of this method is verified using multiple types of receivers and precision single-point positioning experiments. The results show that the accuracy of TurboEdit+LLI for cycle slip detection is significantly improved. Specifically, for the flagship receiver SEPT POLARX5, the number of false detections of cycle slip decreased from 1 807 to 25. In the static positioning mode, TurboEdit+LLI has comparable positioning accuracy in the east (E), north (N), and up (U) directions to TurboEdit and LLI methods. Under simulated kinematic positioning conditions, for some stations such as CIBG, the positioning accuracy in the E, N, and U directions is improved by 36.4%, 59.3%, and 55.9% respectively compared to TurboEdit, and by 43.5%, 7.7%, and 31.5% respectively compared to LLI, effectively improving the positioning performance in complex scenarios.

Keywords: BeiDou navigation satellite system (BDS); cycle slip detection; TurboEdit; loss-of-lock indicator (LLI); precise point positioning (PPP)

收稿日期: 2025-11-27 修回日期: 2026-03-02 接受日期: 2026-04-07 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(41904037); 辽宁省自然科学基金联合计划资助项目(20240336); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212410147011)

作者简介: 高 猛(1988-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事BDS/GNSS高精度定位算法方面的研究。E-mail: gaomeng512@163.com

通信作者: 蔡永平(2001-), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要从事GNSS精密单点定位技术方面的研究。E-mail: 19824844892@163.com

0 引言

北斗卫星导航系统(BDS)已构建全天候高精度定位服务体系,进一步提升北斗定位技术的精度是当前的核心研究方向。周跳探测作为BDS高精度定位的关键技术环节,其准确性直接影响定位解算精度^[1]。

近年来,国内外学者围绕周跳探测方法开展了深入研究。传统方法中,高次差法^[2]、多项式拟合法^[3]和多普勒积分法^[4]等主要适用于单频周跳探测。随着多频技术的发展,单频方法的局限性日益凸显,双频周跳探测方法逐渐成为研究重点。目前常用的方法包括相位伪距结合^[5]、墨尔本-维贝纳(Melbourne-Wübbena, MW)组合^[6-7]、无几何(geometry-free, GF)组合^[8]及 TurboEdit^[9-11]等方法。TurboEdit在双频周跳探测过程中应用最广泛,但其探测性能受MW组合伪距噪声及GF组合电离层干扰的影响较大^[12-14]。为此,学者对TurboEdit方法进行了改进。文献[15]通过改进的GF组合历元差分法,有效削弱电离层延迟的影响。研究发现,通过选择合适的阈值,即使处于高电离层闪烁环境,对小周跳、连续周跳也可以实现准确探测。文献[16]在滑动平均滤波MW组合和相邻历元求差的GF组合中引入自适应阈值模型,实现了较低采样率条件下的周跳探测,但模型易将粗差误判为周跳。文献[17]基于MW组合滑动前后向窗口进行宽巷周跳探测,并基于修正的电离层残差对载波相位上的周跳进行探测。与传统TurboEdit相比,该方法在探测小周跳方面优势显著。文献[18]利用高度角加权平均替代传统全历元平均,有效消除了系统性偏差,但仍存在周跳漏检和误检情况。文献[19]在TurboEdit基础上,引入历元差分宽巷组合估计位置参数,并通过残差分析迭代识别周跳。文献[20]利用重构多普勒积分替换MW组合,采用电离层残差的二次时间差法探测周跳。文献[21]通过多项式拟合辅助GF组合进行大周跳探测,并构建GB模型,对小周跳进行探测,该方法在动态场景下易导致GB模型误差增大,周跳探测效率降低。

鉴于此,作者针对TurboEdit在周跳探测中存在的误判与漏判问题,提出一种基于BDS原始观测值中失锁指示器(LLI)与TurboEdit相结合的周跳探测方法(TurboEdit+LLI)。该方法充分融合TurboEdit与LLI的技术优势,构建兼具抗噪声干扰与抗电离层扰动的周跳探测模型。通过不同性能等级的接收机板卡,对比分析传统方法与

TurboEdit+LLI的周跳探测性能,并开展静态、仿动态精密单点定位实验,验证TurboEdit+LLI的有效性和可靠性。

1 TurboEdit+LLI周跳探测法

原始伪距和载波相位观测方程为

$$P_r^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + T + I + \varepsilon_p, \quad (1)$$

$$\lambda\varphi_r^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + T - I + \lambda N_r^s + \varepsilon_\varphi, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中:上标s代表北斗卫星,下标r代表接收机; P 为伪距观测值; φ 为载波相位观测值; ρ 为站星距; c 为光速; t_r 为接收机钟差; t^s 为卫星钟差; T 为对流层延迟误差; I 为电离层延迟误差; ε_p 为伪距噪声; ε_φ 为载波相位噪声; λ 为波长; N 为载波相位整周模糊度。

1.1 TurboEdit周跳探测法

TurboEdit采用MW组合与GF组合联合实现周跳探测,可表示为

$$N_{MW} = \varphi_1 - \varphi_2 - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{\lambda_{WL}(f_1 + f_2)}, \quad (3)$$

$$N_{GF} = \lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2, \quad (4)$$

式(3)、式(4)中: N_{MW} 为MW组合的周跳探测量; N_{GF} 为GF组合的周跳探测量; f_1 、 f_2 分别B1I、B3I频点的载波频率; P_1 、 P_2 分别为B1I、B3I频点的伪距观测值; φ_1 、 φ_2 分别为B1I、B3I频点的载波相位观测值; λ_1 、 λ_2 分别为B1I、B3I频点的载波波长; λ_{WL} 为宽巷组合波长。

MW组合采用递推方法求得前 t 个历元的平均宽巷模糊度 $\bar{N}_{MW}(t)$ 与方差 $\sigma^2(t)$,即

$$\bar{N}_{MW}(t) = \bar{N}_{MW}(t-1) + \frac{1}{t} [N_{MW}(t) - \bar{N}_{MW}(t-1)], \quad (5)$$

$$\sigma^2(t) = \sigma^2(t-1) + \frac{1}{t} \left[(N_{MW}(t) - \bar{N}_{MW}(t-1))^2 - \sigma^2(t-1) \right]. \quad (6)$$

若MW组合满足式(7)、式(8),则判定当前历元发生周跳。

$$|N_{MW}(t) - N_{MW}(t-1)| \geq 4\sigma(t-1), \quad (7)$$

$$|N_{MW}(t) - N_{MW}(t+1)| \leq 1. \quad (8)$$

若GF组合满足式(9)、式(10),则判定当前历元发生周跳。

$$|N_{GF}(t) - N_{GF}(t-1)| > 6(\lambda_2 - \lambda_1), \quad (9)$$

$$|N_{GF}(t+1) - N_{GF}(t)| < \lambda_2 - \lambda_1. \quad (10)$$

TurboEdit周跳探测时,MW组合通过双频载波相位与伪距组合观测值建立方程来探测周跳,GF组合则利用双频载波相位观测值的电离层残差

来探测周跳。若将两者结合, 则需基于观测数据进行阈值判断。然而, 在信号传播过程中, 多路径干扰或信号遮蔽等复杂环境会导致伪距观测噪声显著增大, 同时引发电离层残差异常波动, 进而造成 TurboEdit 的周跳探测失误率相应增加。

1.2 LLI周跳探测法

原始观测值序列中存在信号锁定状态的 LLI, 该参数通过实时监测载波环路的状态分析信号质量指标, 直接判断接收机是否失去对卫星信号的稳定跟踪。当信号因遮挡、多路径效应等因素干扰导致跟踪中断时, LLI 会触发并标记相应历元数据为不可靠数据。LLI 参数含义见表 1。其中, 半周模糊度是指在确定整周模糊度时, 受信号特性或数据处理方法影响, 模糊度无法被唯一确定为整数进而存在半整数不确定性的现象; 半周跳是指载波相位观测值在相邻历元间发生半个周跳的不连续性跳变现象; BOC (binary offset carrier) 和 MBOC (multiplexed binary offset carrier) 均为 BDS 信号调制技术。BOC 跟踪 MBOC 信号时, 表示该历元观测值受噪声影响较大。

表 1 LLI 参数含义		
Tab.1 Meaning of the LLI parameters		
十进制	二进制	含义
0	000	信号跟踪正常
1	001	前后历元间失锁, 可能发生周跳
2	010	可能存在半周模糊度或半周跳
3	011	前后历元间失锁, 可能存在半周跳
4	100	BOC 跟踪 MBOC 信号
5	101	前后历元间失锁, 同时 BOC 跟踪 MBOC 信号
6	110	可能存在半周跳, 同时 BOC 跟踪 MBOC 信号
7	111	前后历元间失锁, 可能存在半周跳, 同时 BOC 跟踪 MBOC 信号

LLI 的性能取决于接收机板卡自身性能, 核心在于接收机芯片的信号处理能力。高性能的信号处理可有效抑制环境噪声、多路径效应等因素的干扰, 进而增强卫星信号在复杂环境下的跟踪稳定性。跟踪稳定性的提升, 可直接降低 LLI 异常触发的频率, 提升观测数据的整体质量。考虑到 TurboEdit 易受伪距噪声或电离层干扰的影响而发生误判, LLI 进行周跳探测时虽可有效标记信号失锁状态, 却无法精准判定周跳的具体位置, 本文提出一种联合策略 TurboEdit+LLI, 其探测流程见图 1。

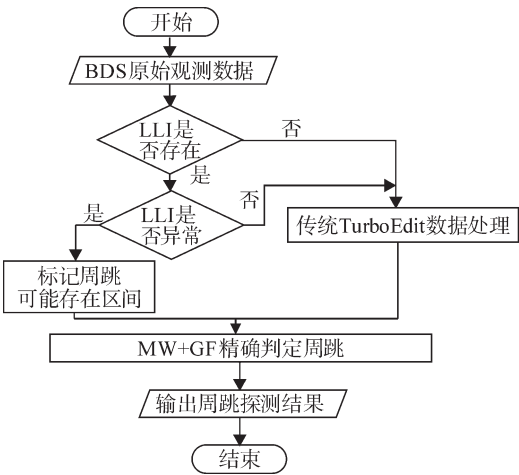


图 1 TurboEdit+LLI 周跳探测流程

Fig.1 TurboEdit+LLI cycle slip detection process

2 实验验证与结果分析

采用国际 GNSS 组织 (IGS) 提供的数据, 选取 2024 年年积日 275、总时长 24 h、采样间隔 30 s 的 8 个测站数据。测站分布见图 2。实验涉及的接收机型号包括杰瓦德 (JAVAD)、徕卡 (LEICA)、赛普天诺 (Septentrio) 及天宝 (Trimble), 详细信息见表 2。

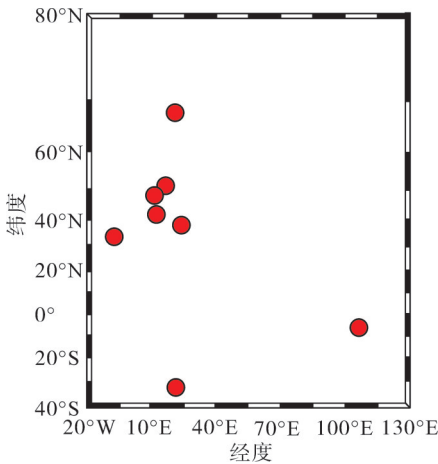


图 2 测站分布

Fig.2 Distribution of measurement stations

表 2 接收机详细信息		
Tab.2 Detailed information of the receivers		
接收机类型	型号	特点
基础型	LEICA GR30	早期产品, 功能相对简单
	JAVAD TRE_3	
	JAVAD TRE_3 DELTA	
中端型	SEPT ASTERX4	性能均衡稳定
旗舰型	LEICA GR50	多频多系统信号跟踪能力强、精度高、抗干扰性能好
	TRIMBLE ALLOY	
	SEPT POLARX5	
	SEPT POLARX5TR	

2.1 不同类型接收机周跳探测结果分析

不同探测方法下基础型接收机的周跳探测结果分别见图3~图5。

由图3可知,对于LEICA GR30基础型接收机,MW组合标记周跳历元31个,GF组合标记周跳历元42个。正常情况下LLI参数的输出为空白(图中以0代替),当检测到可能发生周跳时,其输出值为1,图3(c)中LLI的B1I、B3I频点共标记周跳历元113个。当信噪比(signal noise ratio, SNR)发生变化时,TurboEdit和LLI均能检测到周跳。在周跳发生的历元,测站所在地区正值降雨,电离层活动剧烈,在此环境下GF组合受电离层影响显著,易发生周跳误判或漏判情况。TurboEdit标记周跳历元81个,TurboEdit+LLI标记周跳历元96个。结合卫星高度角变化可知,低高度角时卫星信号易受电离层扰动影响,GF组合误判率显著升高。TurboEdit+LLI通过LLI参数的辅助作用,有效剔除了GF组合的误判历元,提升了周跳探测的可靠性。

由图4可知,对于JAVAD TRE_3基础型接收机,MW组合、GF组合均未标记出周跳。正常情况下LLI参数输出为空白(图中以9代替),LLI未能检测到周跳。由于JAVAD TRE_3基础型接收机

发布时间较早,受硬件限制,原始观测数据中未包含LLI参数,无法利用TurboEdit+LLI来验证其性能。整体来看,JAVAD TRE_3基础型接收机周跳发生率较低,TurboEdit即可满足探测需求。

由图5可知,对于JAVAD TRE_3 DELTA基础型接收机,MW组合标记周跳历元30个,GF组合标记周跳历元42个。随着卫星高度角逐渐降低,最后几个历元卫星信号重新出现,且伴随SNR剧烈跳变,伪距噪声显著增大,最终引发周跳。LLI的B1I、B3I频点共标记周跳历元36个。TurboEdit标记周跳历元48个,TurboEdit+LLI标记周跳历元43个。通过对比可知,TurboEdit+LLI可有效减少误判,提升探测精度。

不同探测方法下SEPT ASTERX4中端型接收机的周跳探测结果见图6。不同方法在不同场景下的探测结果存在差异。LLI仅在个别信号短暂失锁的历元中标记出2个周跳,而MW组合、GF组合均未检测到周跳,可见MW组合、GF组合对这类微弱周跳不敏感。对于中端型接收机,整体周跳探测数量较少,这是由于中端型接收机的硬件稳定性较高、周跳发生率普遍较低,故TurboEdit+LLI对中端型接收机的性能提升效果相对有限。

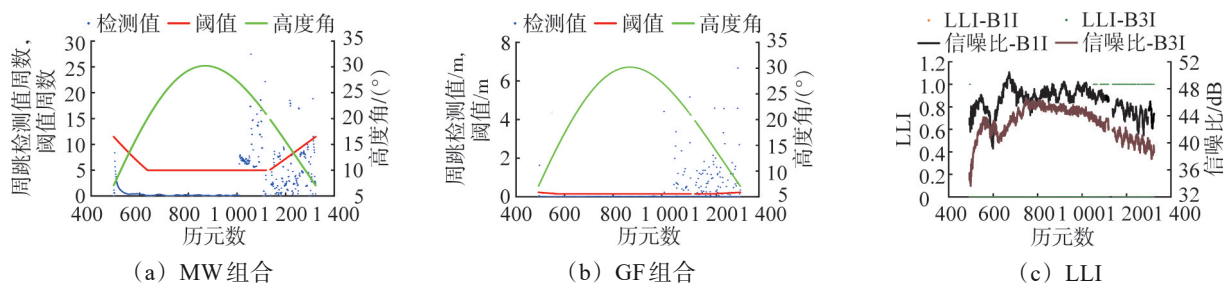


图3 不同探测方法下LEICA GR30基础型接收机的周跳探测结果

Fig.3 Results of cycle slip detection for the LEICA GR30 basic receiver under different detection methods

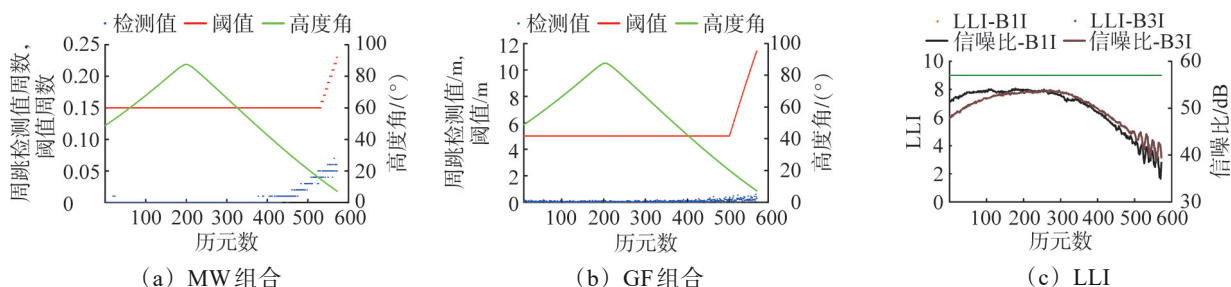


图4 不同探测方法下JAVAD TRE_3基础型接收机的周跳探测结果

Fig.4 Results of cycle slip detection for the JAVAD TRE_3 basic receiver under different detection methods

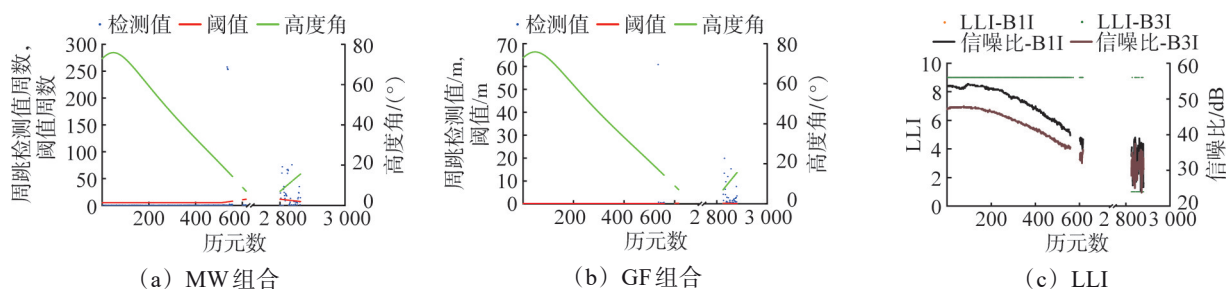


图5 不同探测方法下 JAVAD TRE_3 DELTA 基础型接收机的周跳探测结果

Fig.5 Results of cycle slip detection for the JAVAD TRE_3 DELTA basic receiver under different detection methods

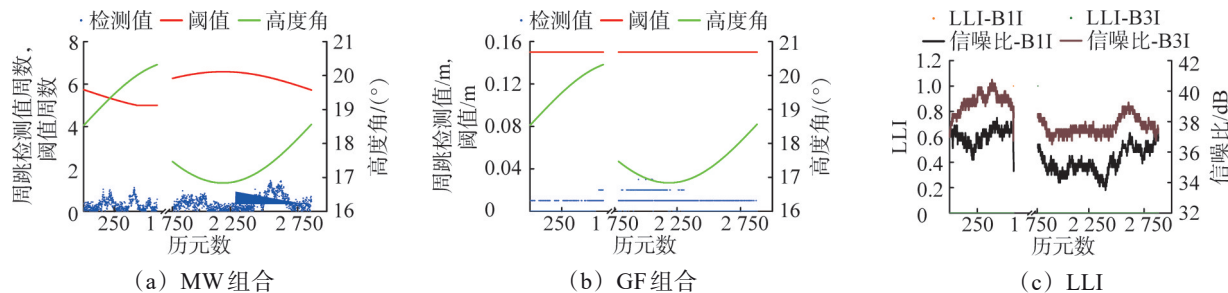


图6 不同探测方法下 SEPT ASTERX4 中端型接收机的周跳探测结果

Fig.6 Results of cycle slip detection for the SEPT ASTERX4 mid-range receiver under different detection methods

不同探测方法下旗舰型接收机的周跳探测结果分别见图7~图10。

由图7可知,对于LEICA GR50 旗舰型接收机, MW 组合标记周跳历元200个, GF 组合标记周跳历元77个。卫星高度角的降低会导致卫星信号穿过大气层的路径显著延长, SNR 下降, 进而使伪距噪声被放大, 严重影响对周跳的准确识别。LLI 的 B1I、B3I 频点共标记周跳历元81个, TurboEdit 标记周跳历元204个, TurboEdit+LLI 标记周跳历元116个, 对信号失锁更为敏感。

由图8可知,对于TRIMBLE ALLOY 旗舰型接收机, MW 组合标记周跳历元163个, GF 组合标记周跳历元126个, LLI 的 B1I、B3I 频点共标记周跳历元217个。TurboEdit 标记周跳历元226个, TurboEdit+LLI 标记周跳历元116个。对比可见, TurboEdit+LLI 可有效剔除误判, 保证探测完整性的同时大幅提升探测精度, 验证了其应用于旗舰型接收机的可靠性。

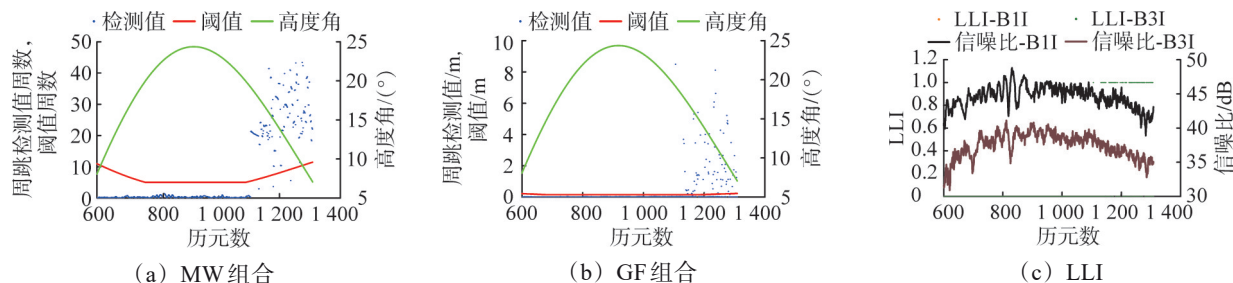


图7 不同探测方法下 LEICA GR50 旗舰型接收机周跳探测结果

Fig.7 Results of cycle slip detection for the LEICA GR50 flagship receiver under different detection methods

由图9可知,对于SEPT POLARX5 旗舰型接收机, MW 组合标记周跳历元1 803个, GF 组合标记周跳历元27个, LLI 的 B1I、B3I 频点共标记周跳历元37个。TurboEdit 标记周跳历元1 807个, TurboEdit+LLI 标记周跳历元25个。SNR 的剧烈波动会导致伪距观测噪声显著增大, 使 MW 组合对噪声极其敏感, 易发生周跳误判。通过对比可知, 高噪声场景下 MW 组合易发生周跳误判, TurboEdit+LLI 可有效减少噪声引发的误判。

由图10可知,对于SEPT POLARX5TR 旗舰型接收机, MW 组合标记周跳历元36个, GF 组合标记周跳历元1个, LLI 的 B1I、B3I 频点共标记周跳历元3个。TurboEdit 标记周跳历元36个, TurboEdit+LLI 标记周跳历元8个。对比可见, SEPT POLARX5TR 旗舰型接收机周跳发生率较低, TurboEdit 存在个别噪声误判情况, 而 TurboEdit+LLI 通过 LLI 参数可进一步过滤噪声干扰, 在低周跳场景下依然能保持良好的探测性能。

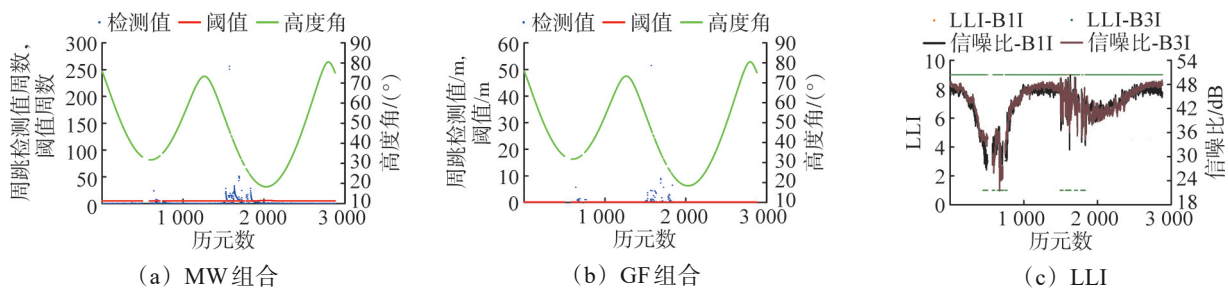


图8 不同探测方法下 TRIMBLE ALLOY 旗舰型接收机的周跳探测结果

Fig.8 Results of cycle slip detection for the TRIMBLE ALLOY flagship receiver under different detection methods

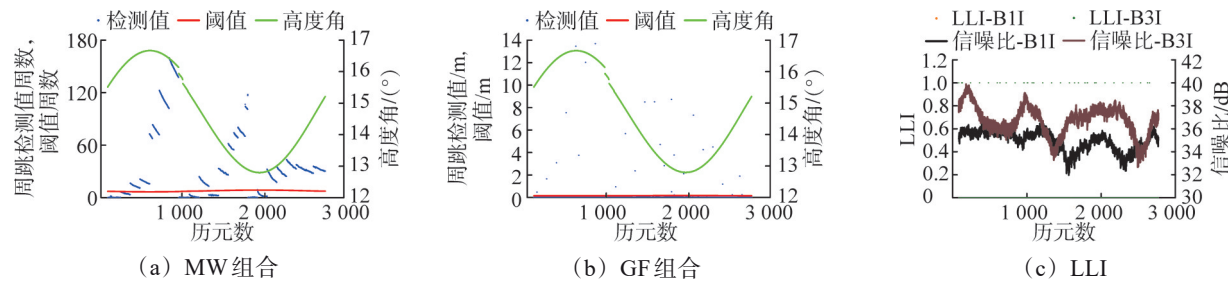


图9 不同探测方法下 SEPT POLARX5 旗舰型接收机的周跳探测结果

Fig.9 Results of cycle slip detection for the SEPT POLARX5 flagship receiver under different detection methods

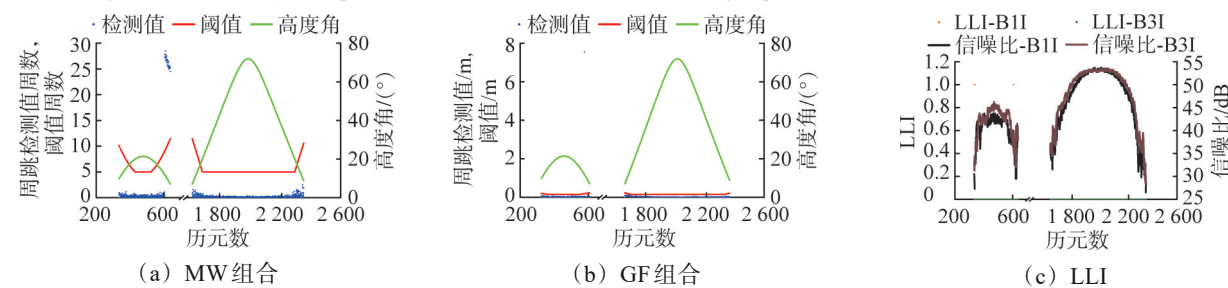


图10 不同探测方法下 SEPT POLARX5TR 旗舰型接收机的周跳探测结果

Fig.10 Results of cycle slip detection for the SEPT POLARX5TR flagship receiver under different detection methods

2.2 周跳探测检测率对比分析

为进一步比较 TurboEdit、LLI、TurboEdit+LLI 的周跳检测率（即检测到的周跳数与实际总历元数之比），对 3 个较典型的测站数据进行分析，结果见图 11。

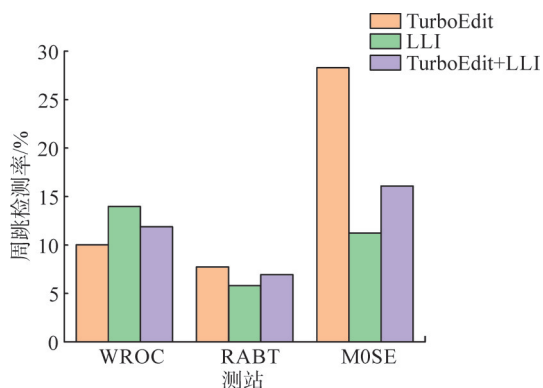


图 11 不同方法的周跳检测率对比

Fig.11 Comparison of cycle slip detection rates of different methods

由图 11 可知，在 WROC 测站，TurboEdit+LLI 的周跳检测率高于 TurboEdit 但低于 LLI。在 RABT、MOSE 测站，TurboEdit+LLI 的周跳检测率低于 TurboEdit 但高于 LLI，表明 TurboEdit+LLI 可有效降低周跳误判、漏判的比例。综合来看，TurboEdit 易受观测噪声与电离层区域强烈活动的影响，LLI 则较依赖硬件信号质量，可能因瞬时遮挡导致判定机制异常。相较于单一方法，TurboEdit+LLI 在探测周跳方面表现更优。

2.3 精密单点定位结果分析

为进一步对比 TurboEdit、LLI、TurboEdit+LLI 的周跳探测能力，以实际定位效果为检验标准，选取 RABT 测站开展静态、仿动态精密单点定位，结果分别见图 12、图 13。静态定位模式下，TurboEdit 在 E、N、U 方向的均方根误差 (RMSE) 分别为 0.046 m、0.006 m、0.042 m，LLI 在 E、N、U 方向的 RMSE 与 TurboEdit 一致，TurboEdit+LLI

在E、N、U方向的RMSE分别为0.042 m、0.006 m、0.033 m。在仿动态定位模式下,与TurboEdit相比,TurboEdit+LLI在E、N、U方向的定位精度分

别提升3.2%、10.7%、9.3%;与LLI相比,在E、N、U方向的定位精度均提高90%以上。

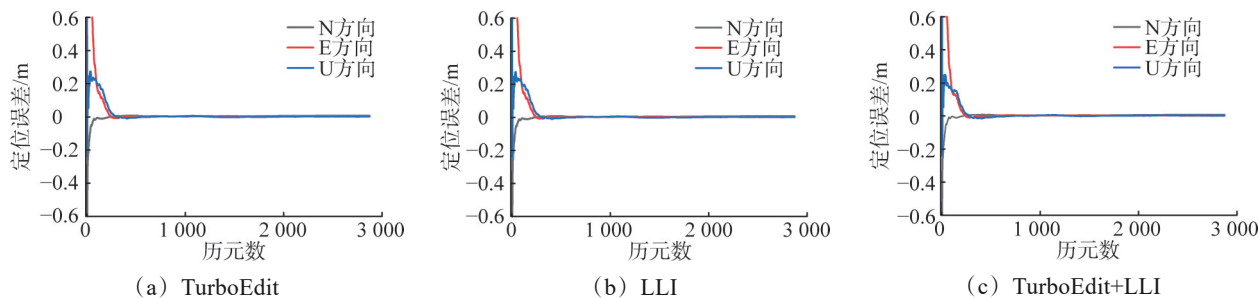


图12 不同周跳探测方法下的静态定位结果对比

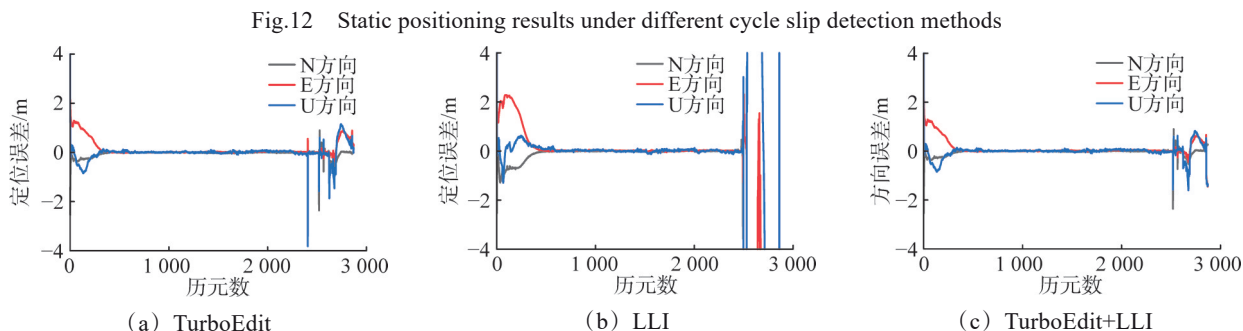


图13 不同周跳探测方法下仿动态定位结果对比

Fig.13 Dynamic simulation positioning results under different cycle slip detection methods

采用TurboEdit、LLI、TurboEdit+LLI对其余7个测站的接收机观测数据开展静态、仿动态精密单点定位实验,解算后的RMSE分别见表3、表4。

相较于TurboEdit、LLI,TurboEdit+LLI在周跳探测性能方面表现更优,能实现更高的定位精度。静态定位模式下,在CIBG测站,TurboEdit+LLI在E、N、U方向的定位精度整体上优于TurboEdit、LLI;在SUTM、OBE4、M0SE、DYNG测站,TurboEdit+LLI的定位精度与TurboEdit、LLI基本一致;在WROC测站,TurboEdit+LLI在N、U方向的定位精度比TurboEdit

更优;在KIRU测站,TurboEdit+LLI的定位精度与TurboEdit持平。仿动态定位模式下,在OBE4、DYNG测站,TurboEdit、LLI、TurboEdit+LLI的定位精度一致;在CIBG测站,相较于TurboEdit,TurboEdit+LLI在E、N、U方向的定位精度分别提升36.4%、59.3%、55.9%,相较于LLI分别提升43.5%、7.7%、31.5%;在WROC、SUTM、M0SE、KIRU测站,TurboEdit+LLI的定位精度与TurboEdit、LLI中表现最优的方法相当,验证了TurboEdit+LLI在周跳探测中的可行性与可靠性。

表3 不同周跳探测方法下的静态RMSE

Tab.3 Static RMSE values of the three cycle slip detection methods for each station

测站	TurboEdit的RMSE/cm			LLI的RMSE/cm			TurboEdit+LLI的RMSE/cm		
	E方向	N方向	U方向	E方向	N方向	U方向	E方向	N方向	U方向
WROC	0.017	0.012	0.022	0.017	0.011	0.021	0.017	0.011	0.021
SUTM	0.052	0.009	0.031	0.053	0.009	0.031	0.052	0.009	0.031
OBE4	0.009	0.006	0.006	0.009	0.006	0.006	0.009	0.006	0.006
M0SE	0.036	0.021	0.028	0.036	0.020	0.028	0.036	0.020	0.028
CIBG	0.022	0.011	0.033	0.012	0.010	0.028	0.012	0.010	0.027
DYNG	0.006	0.003	0.017	0.006	0.003	0.017	0.006	0.003	0.017
KIRU	0.013	0.012	0.017	0.009	0.008	0.013	0.013	0.012	0.017

表 4 不同周跳探测方法下的伪动态 RMSE
Tab.4 Simulate dynamic RMSE values of the three cycle slip detection methods for each station

测站	TurboEdit 的 RMSE/cm			LLI 的 RMSE/cm			TurboEdit+LLI 的 RMSE/cm		
	E 方向	N 方向	U 方向	E 方向	N 方向	U 方向	E 方向	N 方向	U 方向
WROC	0.075	0.098	0.178	0.050	0.050	0.134	0.050	0.050	0.134
SUTM	0.072	0.015	0.053	0.074	0.016	0.056	0.072	0.015	0.053
OBE4	0.066	0.041	0.089	0.066	0.041	0.089	0.066	0.041	0.089
M0SE	0.068	0.037	0.132	0.070	0.031	0.127	0.070	0.030	0.127
CIBG	0.055	0.059	0.143	0.062	0.026	0.092	0.035	0.024	0.063
DYNG	0.036	0.056	0.104	0.036	0.056	0.104	0.036	0.056	0.104
KIRU	0.020	0.021	0.054	0.015	0.020	0.050	0.020	0.021	0.054

3 结论

提出一种利用 LLI 参数改进 TurboEdit 的北斗周跳探测方法 (TurboEdit+LLI)，通过 TurboEdit 与 LLI 优势融合，构建抗噪声与抗电离层干扰的周跳探测模型。主要结论如下。

(1) 通过基础型、中端型、旗舰型多类型接收机实验，验证 TurboEdit+LLI 的周跳探测性能。TurboEdit+LLI 可显著提升北斗周跳探测的准确率，有效降低噪声与电离层扰动，周跳探测效果较好。

(2) 静态和伪动态精密单点定位实验结果表明，TurboEdit+LLI 可有效提升北斗定位精度。静态定位模式下，其定位精度与 TurboEdit、LLI 基本持平，在个别测站实现了定位精度的小幅度优化；伪动态定位模式下，TurboEdit+LLI 的定位性能优势显著，可有效改善复杂动态场景下的定位精度，较为可靠。

本实验仅利用伪动态数据进行定位性能分析，未来研究中可进一步通过真实动态实验来验证 TurboEdit+LLI 的性能。

参考文献 (References) :

[1] Zhang W H,Wang J L.A real-time cycle slip repair method using the multi-epoch geometry-based model[J]. GPS Solutions,2021,25:60.
[2] Li S S,Feng W,Huang D F.An integration scheme of simultaneous cycle slips determination combining improved geometry-free combination and TDCP model for undifferenced GNSS data[J]. Measurement Science and Technology,2024,35: 056307.
[3] Li B F,Qin Y N,Liu T X.Geometry-based cycle slip and data gap

repair for multi-GNSS and multi-frequency observations[J]. Journal of Geodesy,2019,93:399-417.
[4] 王建敏,王清旺,黄佳鹏.多普勒积分辅助 BDS 三频周跳探测[J]. 导航定位学报,2023,11(3):80-89.
Wang Jianmin,Wang Qingwang,Huang Jiapeng.Doppler integration assisted BDS triple frequency cycle slip detection[J]. Journal of Navigation and Positioning,2023, 11(3):80-89.
[5] 王思凡,李建章,隋哲民.电离层残差法与相位减伪距法联合探测与修复 BDS 观测值中的周跳[J]. 导航定位学报,2021,9(5): 89-95,120.
Wang Sifan,Li Jianzhang,Sui Zhemin. Research on detection and reparation for cycle slip in BDS observations using combination of phase ionospheric residual method and phase reduce pseudorange method[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(5): 89-95,120.
[6] 吕伟才,高井祥,严超,等.北斗三频载波伪距组合观测值的周跳探测算法研究[J].大地测量与地球动力学,2020,40(2):117-122.
Lyu Weicai,Gao Jingxiang,Yan Chao,et al.Research on cycle slip detection algorithm for Beidou triple-frequency carrier pseudorange combination[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(2): 117-122.
[7] 景鑫,李建文,李林阳,等.全变分 MW 组合去噪的 BDS 周跳探测算法[J]. 导航定位学报,2023,11(2):176-185.
Jing Xin,Li Jianwen,Li Linyang,et al.Detection algorithm of BDS cycle slips based on total variational MW combination denoising[J]. Journal of Navigation and Positioning,2023,11(2):176-185.
[8] Xiang Y,Lyu S J,Yu W X.Identifying spurious cycle slips based on iterative filtering under disturbed ionospheric conditions for undifferenced GNSS observations[J]. Advances in Space Research, 2022,70:3582-3593.
[9] 闫文杰,沈佳磊,皮秋阳,等.顾及病态性的 BDS-3 三频周跳探测与

- 修复新方法[J].测绘科学,2024,49(9):30-38.
- Yan Wenjie, Shen Jiale, Pi Qiuyang, et al. A new triple-frequency BDS-3 cycle slip detection and repair method considering the III-condition problem based on the WACMRI algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2024, 49(9): 30-38.
- [10] 陈晓辉, 田慧, 王涛. BDS/GPS 双差组合观测数据周跳探测与修复方法研究[J]. 测绘科学, 2020, 45(11): 33-40.
- Chen Xiaohui, Tian Hui, Wang Tao. Research on cycle slip detection and repair method of BDS/GPS dual-difference combined data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(11): 33-40.
- [11] Zhou H T, Wang L, Fu W J, et al. Real-time GNSS triple-frequency cycle slip detection using three optimal linear combinations[J]. GPS Solutions, 2023, 27: 142.
- [12] Cai C S, Liu Z Z, Xia P F, et al. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity[J]. GPS Solutions, 2013, 17(2): 247-260.
- [13] 范丽红, 王利, 张明, 等. 基于MW与STPIR组合的周跳探测与修复方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 790-794.
- Fan Lihong, Wang Li, Zhang Ming, et al. A combination of MW and second-order time-difference phase ionospheric residual for cycle slip detection and repair[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6): 790-794.
- [14] 梁凌峰, 李克昭, 张捍卫, 等. 一种LM-BP加速搜索的周跳探测与修复方法[J]. 导航定位学报, 2024, 12(1): 35-42.
- Liang Lingfeng, Li Kezhao, Zhang Hanwei, et al. A cycle slip detection and repair method for LM-BP accelerated search[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2024, 12(1): 35-42.
- [15] 夏磊, 赖祖龙, 梅长松, 等. 实时周跳探测与修复的TurboEdit历元差优化算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 920-927.
- Xia Lei, Lai Zulong, Mei Changsong, et al. An improved algorithm for real-time cycle slip detection and repair based on TurboEdit epoch difference model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6): 920-927.
- [16] 张小红, 曾琪, 何俊, 等. 构建阈值模型改善TurboEdit实时周跳探测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(3): 285-292.
- Zhang Xiaohong, Zeng Qi, He Jun, et al. Improving TurboEdit real-time cycle slip detection by the construction of threshold model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(3): 285-292.
- [17] 王振杰, 聂志喜, 欧吉坤. 一种基于TurboEdit改进的GPS双频观测值周跳探测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9): 1017-1021.
- Wang Zhenjie, Nie Zhixi, Ou Jikun. An improved cycle slip detection based on turbo edit method for dual-frequency GPS receiver[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(9): 1017-1021.
- [18] 张晨晰, 党亚民, 薛树强, 等. 一种基于TurboEdit的BDS周跳探测改进方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(6): 47-52, 64.
- Zhang Chenxi, Dang Yamin, Xue Shuqiang, et al. An improved BDS cycle slip detection method based on TurboEdit[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(6): 47-52, 64.
- [19] Xu X F, Nie Z X, Wang Z J, et al. A modified TurboEdit cycle-slip detection and correction method for dual-frequency smartphone GNSS observation[J]. Sensors, 2020, 20: 5756.
- [20] 蔡成林, 沈文波, 曾武陵, 等. 多普勒积分重构与STPIR联合周跳探测与修复[J]. 测绘学报, 2021, 50(2): 160-168.
- Cai Chenglin, Shen Wenbo, Zeng Wuling, et al. Detect and repair cycle-slip by reconstruction Doppler integral algorithm and STPIR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(2): 160-168.
- [21] Zeng J W, Zhang Z T, He X F, et al. Real-time GNSS multiple cycle slip detection and repair based on a controllable geometry-based method in relative positioning[J]. Measurement, 2023, 216: 112940.